

厚生労働科学研究研究費補助金  
労働安全衛生総合研究事業

破断面から破断荷重を推定するための  
定量解析システムの開発

平成19年度 総括研究報告書

主任研究者 山際 謙太

平成20(2008)年 4月

## 目 次

I. 総括研究報告	
破断面から破断荷重を推定するための定量解析システムの開発 .....	1
山際謙太	
II. 分担研究報告	
1. SM490A の回転曲げ疲労試験の破断面観察と	
粗さを用いた応力推定.....	5
山際謙太	
2. SM490A 母材の回転曲げ疲労試験 .....	10
酒井信介	
III. 研究成果の刊行に関する一覧表 .....	13
IV. 研究成果の刊行物・別刷 .....	14

厚生労働科学技術研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）  
総括研究報告書

破断面から破断荷重を推定するための定量解析システムの開発

主任研究者 山際謙太 独立行政法人労働安全衛生総合研究所研究員

研究要旨 機械構造物の破壊事故の中に、溶接部における金属疲労を原因とするものがある。疲労破断面の特徴はストライエーションであり、破断荷重推定に用いられる。しかし、実機の事故破断面には圧縮荷重の影響でストライエーションが観察されないケースもある。このような場合、破断荷重推定は難しく、粗さなどのパラメータを用いて推定する技術が研究されている。本研究では1) 溶接構造用圧延鋼材 SM490A の平滑丸棒試験片を用いて回転曲げ疲労試験を実施し、2) 破断面の粗さと応力の関係について検討を行った。その結果、応力振幅と粗さの間に相関があり、圧縮応力の影響により破断面が損傷している場合、粗さは小さくなり、これが応力振幅の高い条件で起きることが確認された。

分担研究者氏名・所属機関名及び所属機関  
における職名

酒井信介・東京大学工学部教授

A. 研究目的

機械構造物の破壊事故の中に、溶接部における金属疲労を原因とするものがある。事故調査において、疲労破壊の特徴であるストライエーションが観察される場合は応力推定を行うことが可能であるが、実機の場合は圧縮の荷重がかかることで破断面が押しつぶされ、ストライエーションが観察されないこともある。このような場合、表面粗さを用いることで応力推定を行う研究が行われている。本研究では、1) 溶接構造用圧延鋼材 SM490A の平滑丸棒試験片を用いて回転曲げ疲労試験を実施し、2) 破断面の粗さと応力の関係について検討を行った。

B. 研究方法

1) SM490A 回転曲げ疲労試験

供試材は JIS G 3106 相当の SM490A 板材を用いた。試験片は JIS Z2274 に準拠した平滑丸棒試験片を用いた。なお試験片表面仕上げはエメリーペーパー(#800)を用い、機械加工時の周方向の傷が無くなるまで軸方向に研磨した。

疲労試験には島津製作所製小野式回転曲げ試験機 H5 型を用いた。試験機の本仕仕様は最大曲げモーメント 98N・m、回転速度は応力によって 300~3600rpm の範囲で調整した。なお試験片セット時の芯振れは 0.05mm 以下であった。

試験条件は室温大気中、正弦波、 $R=-1$ 、とした。試験片の本数は 15 本である。応力振幅の設定は試験平行部の直径から求めた断面積による公称応力である。

2) 破断面の粗さ計測

破断面の観察にはレーザー顕微鏡 (KEYENCE VK9500) を使用した。破断面の 3 次元形状を計測した。次に粗さ解析ソフトウェアを用いて、3 次元形状の算術平均粗さ (Ra: B0601-2001) 求めた。

C. 研究結果

1) SM490A 回転曲げ疲労試験結果

試験結果から得られた S-N 線図を図 1 に示す。2 本の試験が未破断、1 本の試験が 3600rpm で実施したため試験片に発熱が生じた。

2) 破断面観察結果

破断面の巨視的観察を行ったところ、応力振幅が低い場合、破断までの繰り返し数が大きく、破断面が平坦であった。一方、応力振幅が高い場合は、繰り返し数が少な

く、破断面の凹凸が大きい。

この破断面の中心部分の観察を行った。観察に使用した対物レンズの倍率は100倍である。観察した破断面の枚数はそれぞれの試験片ごとに3箇所である。

観察した破断面の写真の例を図2に示す。視野の大きさは $140\mu\text{m}\times 105\mu\text{m}$ である。また、この破断面の3次元形状から表面粗さの概念を3次元形状の粗さ計測に拡張して、粗さ解析を行った。解析の前処理にはメディアフィルターを1度使用した。求めた粗さパラメータは算術平均粗さ(Ra: JIS B0601-2001)である。応力振幅とRaの関係を図3に示す。

#### D. 考察

1) 回転曲げ疲労試験結果による疲労減の推定

図1中の近似式は未破断と発熱した3本のデータを除き最小自乗法によるStromeyer型に近似した。この曲線は次式で表される。

$$\sigma_a = 32206 N_f^{0.524} + 275 \quad (\text{MPa})$$

この曲線より求めた疲労限強度は $10^{10}$ サイクルと仮定した場合275MPaと推定される。

2) 応力振幅と粗さの関係

図2から破断面の一部にストライエーションが観察されている。ストライエーションの幅は約 $0.72\mu\text{m}$ であるが、回転曲げ試験のためき裂進展速度との関係は不明である。また、ストライエーションの周辺は試験中に反対側の破断面と接触したため平坦な破断面となっている。これは回転曲げ試験であり応力比が-1であることに起因している。このように試験片の反対側と接触したことにより破断面の特徴が消えてしまうことが実機の破断面では多く、粗さなどの数値からの応力推定が期待される。

巨視的観察では、応力振幅が高い場合、き裂は試験片表面近傍の複数箇所から発生し合体しながら破断に至っている。これに対し、応力振幅が低い場合は、ほぼ一部から発生しき裂進展していることがわかる。従って、巨視的な観察をした場合、応力振

幅が高いと破断面の凹凸は大きくなる傾向がある。

しかしながら、図3に示すようにRaと応力振幅の傾向には逆の傾向がみられた。これは応力振幅が高い場合、破断面に圧縮応力が作用したとき破断面が反対側と接触して破損するケースが、応力振幅が低い場合と比較して大きい。そのため、応力振幅が低い破面ではストライエーションがよく観察され、応力振幅の高い破断面ではあまり観察されなかった。そしてストライエーションは破断面上の微細な凹凸であることから、応力振幅が低くストライエーションが観察されやすい場合に、粗さが大きくなる傾向があると考えられる。

#### E. 結論

本研究では、SM490Aの受け入れ材について回転曲げ疲労試験を行った。その結果、疲労限は275MPaと推定される。

次に、破断面について解析を行った。そして粗さと応力についての関係を求めた。応力レベルが低い場合、圧縮応力による破断面の損傷が少ないためストライエーションが観察されることが多く、その結果粗さ(Ra)が大きくなる傾向があることがわかった。しかし、これらの結果はあくまで試験片中心部の破断面様相の場合である。き裂の起点近傍など他の箇所では、また別途の結果がでると考えられ、実際の粗さからの応力推定にはさらに複数の粗さパラメータを組み合わせる必要がある。

#### F. 健康危険情報

無し

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

山際謙太・高梨正祐, 破断面解析支援データベースの試作, ボイラ研究, No. 343, pp.16-24.

##### 2. 学会発表

#### H. 知的財産権の出願・登録状況(予定を含む)

1. 特許取得 無し

2. 実用新案登録 無し

3. その他 無し

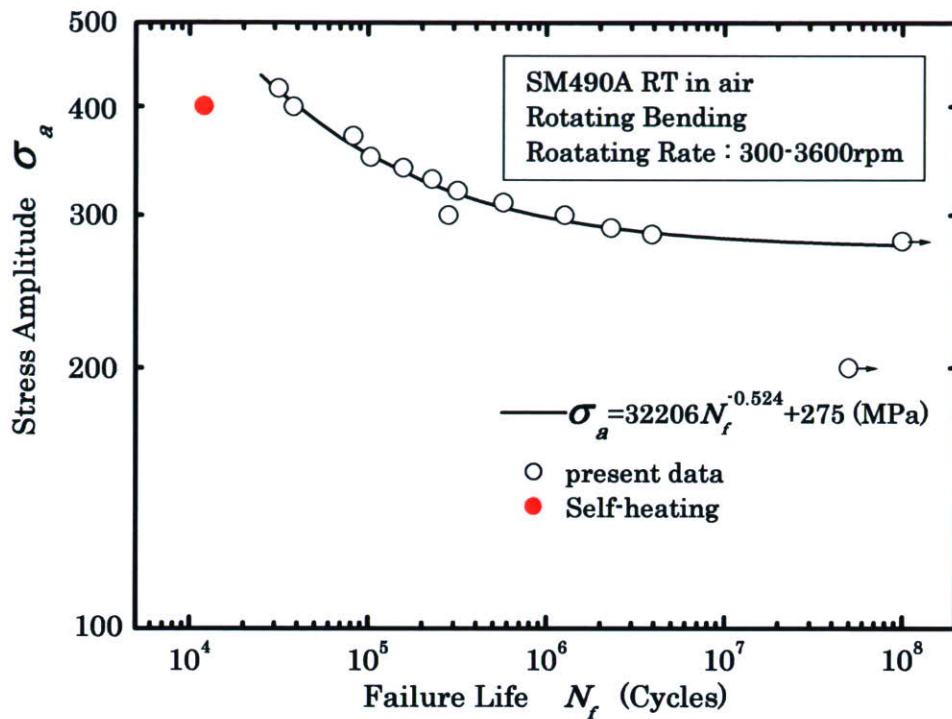


図 1 : SM490A 回転曲げ疲労試験結果

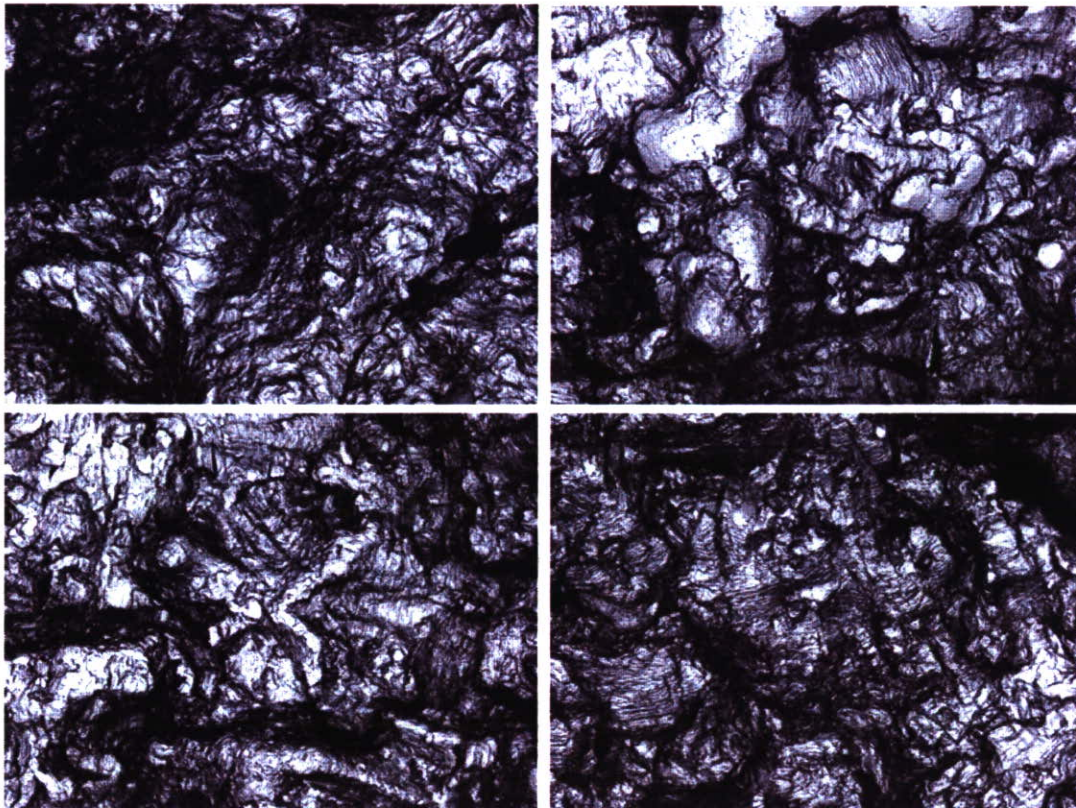


図 2 : レーザー顕微鏡で観察した SM490A の破断面

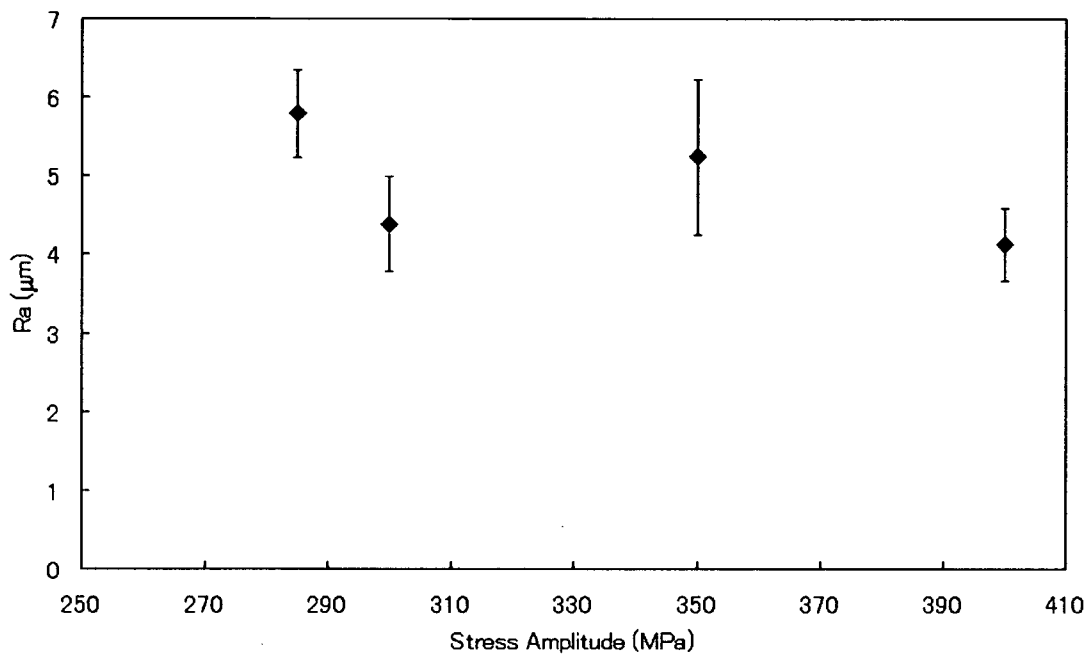


図3：算術平均粗さと応力振幅の関係

厚生労働科学技術研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）  
分担研究報告書

SM490A の回転曲げ疲労試験の破断面観察と粗さを用いた応力推定

主任研究者 山際謙太 独立行政法人労働安全衛生総合研究所研究員

研究要旨 レーザー顕微鏡を用いて SM490A の回転曲げ疲労試験の破断面観察を行い、3次元形状の計測を行った。次に応力と粗さ(Ra)の関係を求めた。その結果、圧縮応力による破断面の損傷が少ない低応力振幅の条件下ではストライエーションが観察され、粗さが大きくなる傾向がみられた。

A. 研究目的

回転曲げ疲労試験の破断面は応力比が  $R=-1$  であることから、試験中に破断面が破断面に疲労破壊の特徴であるストライエーションが観察されることが少ない。このような破断面の場合、粗さなどから応力を推定する研究がなされている（例えば、高梨・材料, Vol. 53, No. 8, p906, 2004）。本研究では SM490A の回転曲げ疲労試験の破断面の観察を行い、応力と粗さの関係について調査した。

B. 研究方法

SM490A の回転曲げ疲労試験の破断面をレーザー顕微鏡（KEYENCE VK9500）で観察し、3次元形状の計測を行う。また、これらの粗さと実験条件の応力との比較検討を行う。

C. 研究結果

破断面の巨視的観察の結果を図1に示す。例えば試験片番号 12 番のように応力振幅が低い場合、破断までの繰返し数が大きく、破断面が平坦であることがわかる。一方、例えば試験片番号 13 番のように応力振幅が高い場合は、繰返し数が少なく、破断面の凹凸が大きいことがわかる。

これら破断面の中心部分の観察を行った。観察に使用した対物レンズの倍率は 100 倍である。レーザー顕微鏡を用いた場合、対物レンズの焦点距離が長いものを採用する必要がある。なぜなら特に凹凸が大きい破断面に対しては、高倍率の対物レンズほど焦点距離が短いため、レンズが破断面に

接してしまうことがある。破断面は試験片番号 3, 8, 11, 12 のものを用いた。観察した破断面の枚数はそれぞれの試験片ごとに 3箇所である。

観察した破断面の写真を図2に示す。視野の大きさは  $140\mu\text{m} \times 105\mu\text{m}$  である。また、この破断面の3次元形状から表面粗さの概念を3次元形状の粗さ計測に拡張して、粗さ解析を行った。解析の前処理にはメディアンフィルターを1度使用した。求めた粗さパラメータは算術平均粗さ(Ra: JIS B0601-2001)である。応力振幅と Ra の関係を図3に示す。

D. 考察

図2から試験片番号 8, 12 には破断面の一部にストライエーションが観察されている。試験片番号 8 の右上に観察されるストライエーションの幅は約  $0.72\mu\text{m}$  であるが、回転曲げ試験のためき裂進展速度との関係は不明である。また、ストライエーションの周辺は試験中に反対側の破断面と接触したため平坦な破断面となっている。これは回転曲げ試験であり応力比が  $-1$  であることに起因している。このように試験片の反対側と接触したことにより破断面の特徴が消えてしまうことが実機の破断面では多く、粗さなどの数値からの応力推定が期待される。

巨視的観察では、応力振幅が高い場合、き裂は試験片表面近傍の複数箇所から発生し合体しながら破断に至っている。これに対し、応力振幅が低い場合は、ほぼ一部か

ら発生しき裂進展していることがわかる。従って、巨視的な観察をした場合、応力振幅が高いと破断面の凹凸は大きくなる傾向がある。

しかしながら、図 3 に示すように Ra と応力振幅の傾向には逆の傾向がみられた。これは応力振幅が高い場合、破断面に圧縮応力が作用したとき表面が反対側と接触して破損するケースが、応力振幅が低い場合と比較して大きい。従って、応力振幅が低い破面ではストライエーションがよく観察され、応力振幅の高い破断面ではあまり観察されなかった。そしてストライエーションは破断面上の微細な凹凸であることから、応力振幅が低くストライエーションが観察されやすい場合に、粗さが大きくなる傾向があると考えられる。

#### E. 結論

本研究では SM490A の回転曲げ疲労試験の破断面について解析を行った。そして粗さと応力についての関係を求めた。応力レベルが低い場合、圧縮応力による破断面の損傷が少ないことからストライエーションが観察されることが多く、その結果粗さ (Ra) が大きくなる傾向があることがわかった。しかし、これらの結果はあくまで試験片中心部の破断面様相の場合である。き裂の起点近傍など他の箇所では、また異なる結果がでると考えられ、実際の粗さからの応力推定にはさらに複数の粗さパラメータを組み合わせる必要がある。

#### F. 健康危険情報

無し

#### G. 研究発表

##### 1. 論文発表

山際謙太・高梨正祐, 破断面解析支援データベースの試作, ボイラ研究, No. 343, pp.16-24.

##### 2. 学会発表

#### H. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)

##### 1. 特許取得

無し

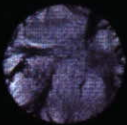
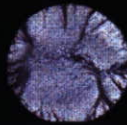
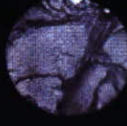
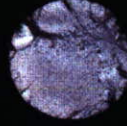
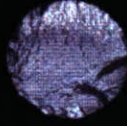
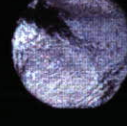
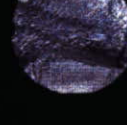

##### 2. 実用新案登録

無し

#### 3. その他

無し



T.P.No.,	Stress Amplitude (MPa)	Failure Life (cycles)	Overview of fracture surface
13	420	31400	
11	400	38300	
14	370	82700	
3	350	103000	
4	340	157000	
5	330	228000	
15	320	316000	
9	310	571000	

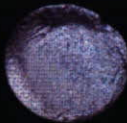

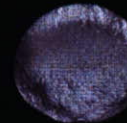

6	300	283000	
8	300	1270000	
10	290	2310000	
12	285	3910000	

図 1 : SM490A の回転曲げ疲労試験後の試験片および破面外観

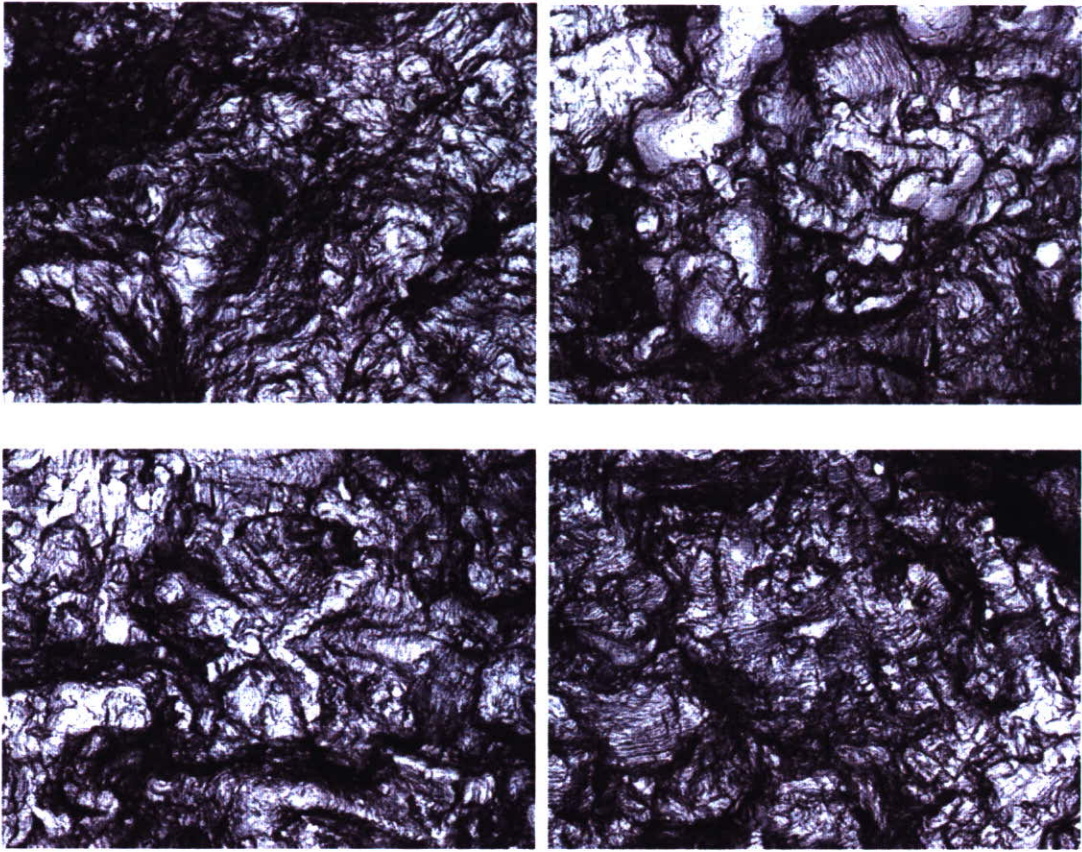


図2： レーザー顕微鏡で観察した SM490A の破断面。試験片番号は左上3，右上8，左下11，右下12。

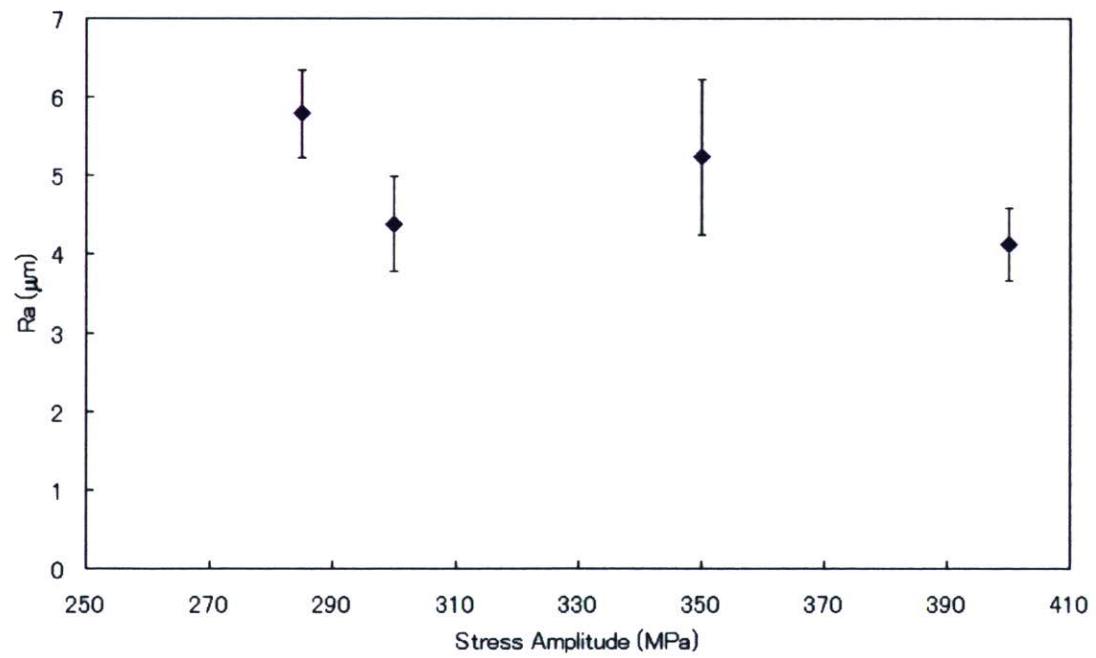


図3：算術平均粗さと応力振幅の関係

厚生労働科学技術研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）  
分担研究報告書

SM490A 母材の回転曲げ疲労試験

分担研究者 酒井信介 東京大学工学部教授

研究要旨 本研究では、破断面データベース用に溶接構造用圧延鋼材 SM490A について回転曲げ疲労試験を行い、疲労限を求めた。疲労限は 275MPa であった。

A. 研究目的

機械構造物の破壊事故の中に、溶接部における金属疲労が挙げられ、溶接構造用圧延鋼材の破断面の調査は重要である。そこで、溶接構造用圧延鋼材 SM490A の室温疲労強度を明らかにするため、平滑丸棒試験片を用いて回転曲げ疲労試験を行い、超高サイクル領域（ $\sim 10^8$  サイクル）の S-N カーブを取得すると共に破面観察に用いる破面の製作を本研究の主な目的とする。

B. 研究方法

供試材は JIS G 3106 相当の SM490A 板材を用いた。供試材のミルシートおよび機械的性質を表 1 に示す。

試験片は JIS Z2274 に準拠した平滑丸棒試験片を用いた。なお試験片表面仕上げはエメリーペーパー（#800）を用い、機械加工時の周方向の傷が無くなるまで軸方向に研磨した。試験片形状を図 1 に示す。

疲労試験には島津製作所製小野式回転曲げ試験機 H5 型を用いた。試験機の主な仕様は最大曲げモーメント 98N・m、回転速度は応力によって 300~3600rpm の範囲で調整した。なお試験片セット時の芯振れは 0.05mm 以下であった（ダイヤルゲージにて測定）。試験装置の外観および試験部拡大を図 2 に示す。

C. 研究結果

試験条件は室温大気中、正弦波、 $R=-1$ 、とした。試験片の本数は 15 本である。応力振幅の設定は試験平行部の直径から求めた断面積による公称応力である。

試験結果を表 2 および試験結果から得られた S-N 線図を図 2 に示す。2 本の試験が未破断、1 本の試験が 3600rpm で実施したため試験片に発熱が生じた。

D. 考察

図 2 中の近似式は未破断と発熱した 3 本のデータを除き最小自乗法による Stromeyer 型に近似した。この曲線は次式で表される。

$$\sigma_a = 32206 N_f^{0.524} + 275 \quad (\text{MPa})$$

この曲線より求めた疲労限強度は  $10^{10}$  サイクルと仮定した場合 275MPa と推定される。

E. 結論

本研究では、SM490A の受け入れ材について回転曲げ疲労試験を行った。その結果、疲労限は 275MPa と推定される。

F. 健康危険情報

無し

G. 研究発表

1. 論文発表

無し

2. 学会発表

無し

I. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得

無し

2. 実用新案登録

無し

3. その他

無し

表1 供試材の化学成分と機械的性質

Chemical Compositions (wt%)							
Material	C	Si	Mn	P	S	Nb	V
SM490A	0.14	0.29	1.28	0.015	0.005	0.013	0.002

Mechanical properties						
0.2%Y.S.	T.S.	Elong.	R.A.	HB	Charpy	
(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(%)		(J/cm <sup>2</sup> )	
411	544	26	—	—	—	

試験片全面  $\nabla\nabla\nabla$

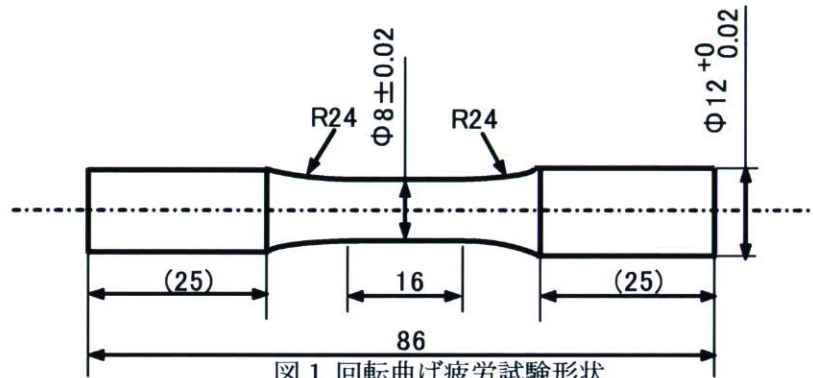
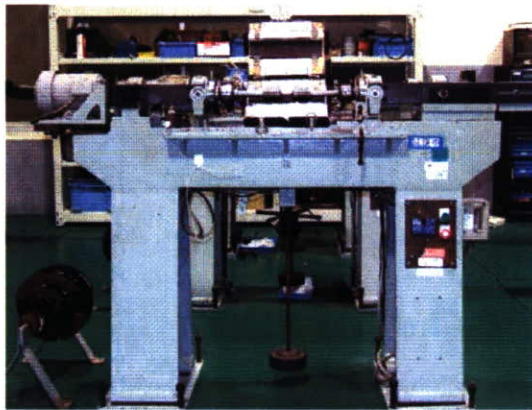
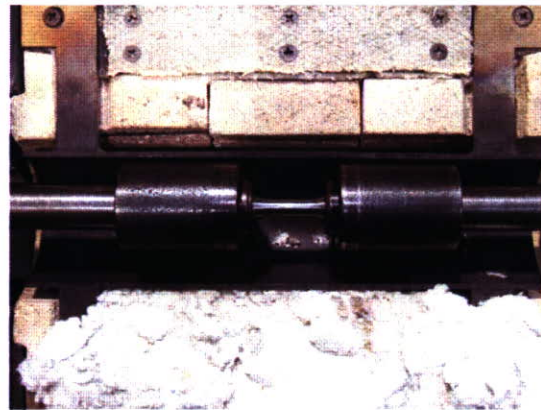


図1 回転曲げ疲労試験形状



回転曲げ疲労試験状況



試験部拡大

図2 回転曲げ疲労試験機外観

表 2 SM490A の回転曲げ疲労試験結果(室温大気中)

T.P.No.	Load	Diameter d (mm)	Rotating Rate (rpm)	Stress Amplitude $\sigma_a$ (MPa)	Failure Life (cycles)	Remarks
13	Rotating bending	7.97	300	420	31400	
11		7.97	600	400	38300	
14		7.97	600	370	82700	
3		7.97	3600	350	103000	
4		7.97		340	157000	
5		7.98		330	228000	
15		7.97		320	316000	
9		7.97		310	571000	
6		7.97		300	283000	
8		7.97		300	1270000	
10		7.98		290	2310000	
12		7.96		285	3910000	
7		7.97		280	$>1 \times 10^8$	Run-out
1		7.97	200	$>5 \times 10^7$	Run-out	
2		7.97	400	15600	Self-heating	

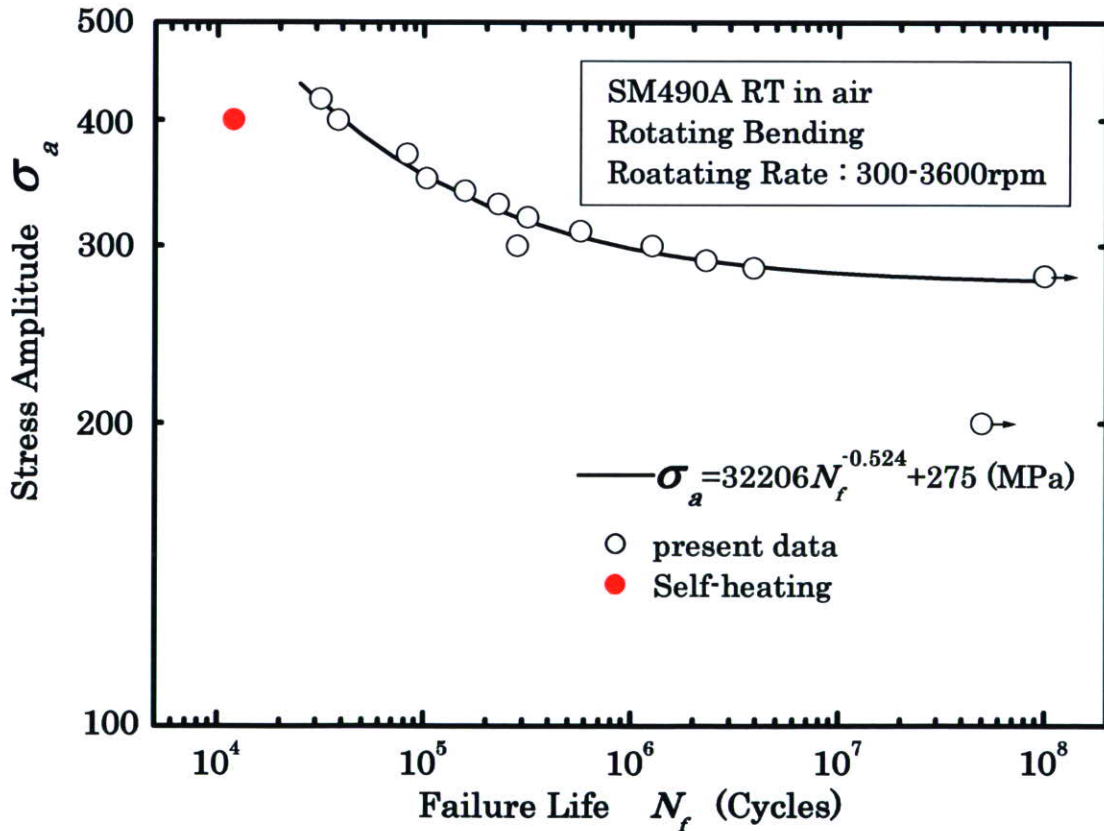


図 2 SM490A の回転曲げ疲労試験における応力振幅と寿命の関係

研究成果の刊行に関する一覧表

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
山際謙太・高梨正祐	破断面解析支援データベースの試作	ボイラ研究	No. 343	pp. 16-24	2007年6月

# ボイラ研究

## Journal of Japan Boiler Association

第 343 号

平成 19 年 6 月

No. 343

June 2007

### — 目 次 CONTENTS —

ぐらびあ 湧水 .....	1	
会長就任にあたって .....	池田五男 .....	4
会長退任にあたって .....	露木 保 .....	5

#### 論 説 Essay

公害防止に係る環境管理の在り方 .....	溝呂木 昇 .....	7
Management of Pollution Control .....	by Noboru Mizorogi	

#### 解 説 Explanation

三重効用高効率ガス吸収冷温水機用高温再生器の開発 .....	牧田和志 .....	11
Development of High-temperature Generator applied to High-efficiency Triple-effect Absorption Chiller-heater .....	by Kazuyuki Makita	
破断面解析支援データベースの試作 .....	山際謙太, 高梨正祐 .....	16
Development of Fractography Database System to Support Fracture Surface Analysis .....	by Kenta Yamagiwa, Masahiro Takanashi	
ボイラーの余寿命診断法の実践 .....	寺本憲宗 .....	33
An Implementation of Boiler Life Expectancy Method .....	by Kenshu Teramoto	
油焼きおよびガス焼きボイラー燃焼設備の安全基準 .....	矢原 仁 .....	42
Safety Guide Principles for Combustion Systems of Oil and Gas Firing .....	by Hitoshi Yahara	

Q & A JIS B 8223「ボイラの給水及びボイラ水の水質」の改訂版(2006年版)の変更点について ～低圧ボイラーについて～ .....	53
情報 平成18年度特級ボイラー技士試験問題 .....	56
お知らせ 平成19年度全国安全週間実施要綱 .....	63
第4回安全衛生フォトコンクール募集要領について .....	67
第35回(平成19年度)労働安全・労働衛生コンサルタント試験のお知らせ(予定) .....	69
機関誌掲載論文等の募集について .....	70

#### カラーページ

interview (会員事業場訪問) 富士フィルム(株)神奈川工場 .....	25
ボイラーおもしろ学 バイオマス(新エネルギー)ってなに? .....	29



## 破断面解析支援データベースの試作

(独)労働安全衛生総合研究所  
山 際 謙 太  
石川島播磨重工業㈱  
高 梨 正 祐

Development of Fractography Database System to Support Fracture Surface Analysis

by Kenta Yamagiwa, Masahiro Takanashi

## 1 はじめに

機械構造物が破壊事故を起こした場合の原因調査の過程において、必ず破断面の調査（フラクトグラフィ）が実施される。（独）労働安全衛生総合研究所では、労働災害の事故調査を行っており、機械構造物の破壊に関する事故調査では、必ず破断面の調査を行う。フラクトグラフィは調査の重要な項目のひとつである。対象とする構造物は多岐にわたり、その中にボイラーと圧力容器も含まれる。また、最近では金属以外のたとえばFRPのような複合材を構成部材とする機械も増えてきたが、調査する材料は金属が主である。

破断面の調査には様々な方法があるが、まず大切なのは肉眼と顕微鏡（光学顕微鏡・電子顕微鏡）を用いた観察である。これを定性的破断面解析と呼ぶ。ここでは、過去の損傷事例や実験室で得られた破断面と実機破断面との比較を行い、損傷原因を推定する<sup>1, 2)</sup>。しかし、観察だけでは、結果が解析者の熟練度に依存してしまうという問題が残る。仮に解析初心者が破断面の判断を誤った場合、事故原因が誤って推定され、その結果正しい再発防止策を打ち出すことは難しくなる。また近年は、2007年問題と呼ばれるように、解析熟練者の高齢化や現場からの離脱にともなう技術伝承不足も問題視されている<sup>3, 4)</sup>。こうした問題点を解決すべく、観察者の経験に依存しない評価方法として、破断面の電子顕微鏡画像と立体的な三次元形状から、数値解析を用いて例えば応力などを推定する定量破断面解析法も提案されている<sup>3, 4)</sup>。

また別な問題点として、データの管理方法が挙げられる。破断面の解析は、損傷調査と破壊メカニズムの研究の一環として行われることが多い。よって破断面のデータは、前者の場合であれば損傷調査報告書に、後者の場合であれば研究論文に掲載されることになる。しかし、定性的な破断面解析では類似破断面との比較が高い重要性を持つにも関わらず、破断面データそのものを保存し、条件により抽出するようなシステムはない。こうした問題点を解決するには、破断面写真とそれに関する情報をリンクさせ、簡便に保存・抽出できるようなデータベースが必要となる。近年、インターネットの普及により、材料強度や物性値などは電子データ化され、短時間で目的のデータに検索可能となった。破断面についても同様なデータベースを導入することで、効率的に類似破断面の検索が可能である。

以上のような背景から、著者らは破断面を定量的に評価し、かつ解析技術の伝承に貢献する仕組みとして、インターネット上で利用できる破断面のデータベースを試作した<sup>5)</sup>。これを「破断面解析支援データベース」と呼ぶ。本システムは、各種モードで破壊した破断面を参照することができるとに加え、表面粗さなど定量的に破断面を特性化するためのプログラムを搭載した。こうした特徴量の一つの目安としながら、定量的に破断面の比較と解析支援を行なえるのが、本システムの特徴である。本稿では、このデータベースについて紹介する。

## 2. 破断面解析支援データベースシステムの概要

### 2.1 システムの構成

破断面解析支援データベースシステムの構成を図1に示す。このデータベースは、パソコンからインターネットを介して利用することができる。

データベースは、「破断面属性テーブル」と「破断面特徴量テーブル」の2テーブルで構成される。属性テーブルには、破断面に関連する情報(タイトル, 材料名, 破断面生成状況など)が格納されている。特徴量テーブルには電子顕微鏡画像のファイル名と観察倍率, 破断面から計算された特徴量など, 破面の電子顕微鏡画像や立体形状に関する情報が保存されている。

次に, 本システムはデータベースと別に特徴量計算を行う機能を持っている。特徴量は破断面の電子顕微鏡画像と三次元形状の両者から計算することが可能であり, 計算はデータ入力時に行われる。新しい特徴量が提案された場合は, それを計算するプログラムを導入することで, 従来の破断面画像から新しく入力するデータまですべて新しい特徴量の計算を行い, 特徴量テーブルに情報を入力することができる。この仕組みを用いることで, 新しい特徴量が提案された際にも, 過去の破断面のデータも効率的に再計算を行うことが可能であるため, 過去の破断面の資産を有効利用でき

る。また, 新しい特徴量を開発する際にも, 様々な破断面に対し適用することが可能であるから, 提案する特徴量の適用範囲の検討にも有効である。

### 2.2 破断面属性テーブル

破断面属性テーブルは, 主に以下の項目で構成されている。

1. タイトル (例: S45Cボルトの疲労破断面)
2. 材料仕様 (JIS S45C)
3. 実機/実験 (実験)
4. 破壊様式 (疲労破壊)
5. 破壊の発生環境 (室温・大気中)
6. 破壊の発生の概要 (M16ボルト・平均応力…)
7. 観察者コメント (疲労き裂起点から2mmの位置…)
8. 破面外観画像へのリンク (URL)
9. 破面電子顕微鏡画像へのリンク (URL)
10. 備考

これらの情報をデータベースに収める目的は, 熟練観察者の破断面に対する知見を蓄積することである。特に観察者のコメントに, 熟練観察者が破断面を分析していくプロセスを記入することで, 観察初心者は熟練者の知見を学ぶことができる。

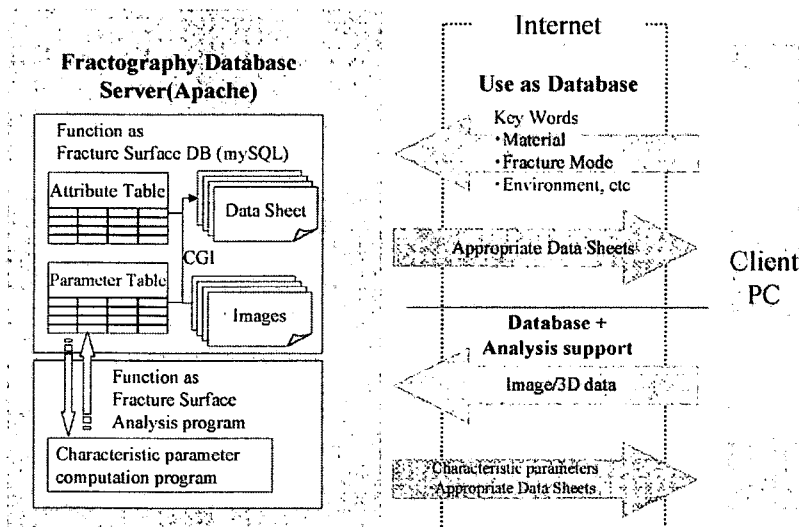


図1 破断面解析支援データベースシステムの構成

また、破断面の観察の基本はマクロ（巨視的）観察とマイクロ（微視的）観察の両方である。どちらが欠けても中途半端な解析となり、正しい解釈は得られない。このことを考慮して、属性テーブルの要素として、破断面の外観写真と電子顕微鏡写真の両方のURLを導入した。画像自身はサーバ内に存在しており、テーブルにはURLのテキストデータのみが保存される。

そして、この属性テーブルに関するフリーキーワードによる検索（例えばS45C AND疲労）を導入した。検索機能を用いることで、観察者は調査すべき破断面のキーワードを入力することで、簡単かつ早急に類似した破断面の情報を引き出すことが可能となる。

### 2. 3 破断面特徴量計算プログラム

破断面属性テーブルは、フラクタルグラフィにおける定性的な解析を支援するための仕組みである。これに対し、定量的な破断面解析を支援するため、本データベースシステムには破断面から特徴量を算出する機能を加えた。特徴量は特徴量テーブルに格納される。いずれの解析も、電子顕微鏡画像データ（256階調濃淡データ）と三次元形状（数値化された破断面の高さ情報）の両方に対して実施できるシステムとなっている。以下、現在計算可能な特徴量について述べる。

#### ・表面性状（粗さ）パラメータ

表面粗さは、破断面形状を数値化する指標であることから、破断面の定量解析によく用いられてきた<sup>8, 9)</sup>。代表的な例としては、算術平均粗さ(Ra)を用いて破断面の性状の分離を行った例がある<sup>10)</sup>。

本データベースにおいても、表面の凹凸形状を数値として示す表面粗さを特徴量の一つに選んだ。日本工業規格JIS B0601:2001表面製品の幾何特性仕様(GPS)にしたがって、表面粗さを求めるプログラムを作成した<sup>11)</sup>。JISに記載されている14種類すべての粗さパラメータを計算し、ユーザが選択した任意のパラメータを表示できるシステムとなっている。なお、表面粗さは1次元に対して定義されるから、画面の水平方向および垂直方向に対して、すべての走査線上で粗さを計測

して、計測方向別の平均値と分散を示した。平均値と分散値を用いることにより、破断面全体の情報を抽出できると考えている。

#### ・フラクタル次元解析

Mandelbrot<sup>12)</sup>によって提唱されたフラクタル次元は、複雑さを表す特徴量である。破断面の複雑さは表面エネルギーとの関連があるために、特にフラクタル次元と破壊靱性との相関が指摘されている。フラクタル次元が等しいからといって、破壊のメカニズムが必ずしも同じという訳ではないが、複雑さを表わす一つの手法として、フラクタル次元も特徴量として採用した<sup>13, 14)</sup>。

#### ・二次元周波数分析

画像の周期性とその方向性を明らかにするために、高速フーリエ変換を実施し、パワースペクトルをビットマップで表示するようにした。周波数分析を行なうことで、例えば疲労破面に観察されるストライエーション（縞状模様）の幅の測定などに利用することができる。

なお、本データベースシステムは、東京大学大学院工学系研究科 酒井・泉研究室のWebサーバ(<http://platon.t.u-tokyo.ac.jp/>)上で試験的に公開中である。

## 3. 破断面データベースシステムのねらい

### 3. 1 数値指標の導入による解析支援

第1章でも述べたとおり、現段階での損傷解析の主流は、損傷した破断面と破断面集などに記載されている破断面との比較を観察者が行うことが最初のプロセスである。ちょうど野山で摘み取った植物などを図鑑で調べるようにして、破断面集から類似破断面を探し出し、定性的に破壊原因の推定が行われる。よって破断の定量解析は、破断面の比較のための指標を与えることで、解析作業を支援できるという位置づけである。

破断面を画像解析の対象と考えた場合に考慮しなければならないことは、全く同じ材料を全く同じ力学的条件で破壊しても、類似した特徴を持つ画像こそ得られるが、全く同じ画像を得ることはできないということである。前述の植物図鑑の例では、観察者は花卉や葉の色、形状といった局所的な情報を頼りに、主観的なパターンマッチング

を試みている。類似画像を抽出する際には、こうした局所的な特徴を頼りに画像を検索する例は多い<sup>15)</sup>。破断面においては、例えばディンプル（延性破壊）、リバーパターン（脆性破壊）、ストライエーション（疲労）といった典型的な模様が存在し、定性的にも見分けることができる。したがって、従来の破断面解析によく用いられてきた。そこで、定量的に類似画像をデータベースから抽出するために、局所的なパターン情報だけでなく、周期性やフラクタル次元などに基づいた破断面の特徴量とその統計的性質を積極的に活用することとした。数値的な指標の導入により、ユーザが破断面解析の経験豊富な技術者である場合には、本データベースシステムは破断面解析の精度向上と客観性の付与に貢献できる。定性的な破断面特徴を十分に読み取ることができない経験の浅い技術者にとっては、類似性の判断を支援することが可能となると考えられる。

### 3. 2 データベースシステムを用いた知識伝承

本データベースシステムは、二通りの使用方法をユーザが選択できるようになっている。一つは、破断面データベース機能のみの使用である。ユーザが破壊機構、材料名、使用環境などをキーワードとして投入すると、サーバ側のデータベースが該当するデータを返すシステムとなっている。検索機能としては、項目を指定しないフリーキーワードによる検索と、項目を指定して検索する機能を備えている。この機能を用いることで、例えば項目指定検索では、同一の破壊様式のデータを閲覧することが可能となる。また、ある破壊様式のデータを閲覧した際に、破断面の特徴的な模様（ストライエーション、ディンプル等）が記述されていれば、次にフリーキーワードによる検索で類似破断面の閲覧が可能である。特に経験の浅い技術者は、この機能を用いることで、熟練観察者の知見を効率的に学ぶことができ、技術伝承の問題解決に貢献することができる。

### 3. 3 データベースと数値解析の融合による体系的なデータ管理

もう一つの機能は、データベースと特徴量計算

プログラムの連携である。ユーザが、電子顕微鏡画像あるいは破断面の三次元形状を投入すると、特徴量を計算する。次に、この計算結果に基づき、類似画像を含む破断面属性と特徴量を返してくれるシステムである。また、このようにして解析に使用されたデータは、データベースに蓄積されるシステムとなっている。したがって、破断面画像と特徴量の二つのデータを客観的かつ体系的に管理することが可能となる。

破断面全体を特徴つけるパラメータは、現段階ではいくつか提案されている。だが、どのような破壊モードの破断面にどのようなパラメータを適用すべきであるかという命題に対する明確な結論は出していない。この原因として考えられる理由は、多くの定量的破断面解析に関する研究は、評価手法の提案が中心となっているためである。手法の提案に多くの労力が割かれ、肝心な提案手法の適用は数少ない破断面に対してのみ行われており、解析対象とする破断面のデータ量が不足している。そのため、汎用的なパラメータを定めることができていない。本システムのように、特徴量と破断面画像およびそれに付随する情報を体系的に蓄積することができれば、破断面を抽出する際のパラメータの選定や、あるいは複数のパラメータを用いた場合にはその重み付けを行い評価するアルゴリズムの開発などへの発展が可能となる。

## 4. 本データベースシステムの使用例

本データベースの使用方法について述べる。ブラウザを開いてデータベースにアクセスした後、最初の画面でデータベースとして使用するか、解析支援システムとして使用するか、選択可能となっている。

### 4. 1 データベースとしての利用

データベースとして使用する場合は、インターネット上でよく利用されている検索エンジンを利用する場合とほぼ同じで、テーブルの全フィールドを対象とした検索と、特定のフィールドを指定した検索が可能となっている。データベースとして利用した場合の画面を図2に示す。破断面属性テーブルのタイトルや材料仕様等にキーワードを設